



Imagerie de speckle dynamique haute cadence appliquée à la vascularisation cutanée et sous-cutanée

High-speed dynamic speckle imaging applied to cutaneous and subcutaneous vasculature

Soutenance de thèse – Simon Erdmann

15 février 2022 à 14h00

Salle des thèses – ISAE-Supaéro, 10 Av. Edouard Belin – 31400 Toulouse

Devant le jury composé de :

Mme Anne Sentenac, Rapporteur

M. Olivier Haerberlé, Rapporteur

M. François Goudail, Examineur

M. Angelo Pierangelo, Examineur

Mme Élise Colin Koeniguer, Co-directrice de thèse

Mme Flora Weissgerber, Co-encadrante de thèse

Résumé

Supposons qu'on image en transmission ou en rétrodiffusion un milieu éclairé en lumière cohérente. Supposons également que ce milieu est tel que la phase du champ rétrodiffusé apparaît en tout point comme aléatoire. On obtient alors un motif également aléatoire constitué de grains: du speckle.

Si, de plus, le milieu varie au cours du temps, le signal de speckle fluctue également. Imager certaines statistiques temporelles du signal peut alors permettre d'imager le mouvement: c'est l'objet de l'imagerie de speckle dynamique. Ses applications sont nombreuses : étude de suspensions colloïdales, de séchage de peinture, imagerie médicale. Elle s'appuie souvent sur l'autocorrélation temporelle du signal: la forme de cette dernière renseigne sur le type de mouvement, et son temps caractéristique de décroissance est lié à la vitesse de fluctuation du milieu.

Cependant, faute de caméras suffisamment rapides, il a longtemps été impossible d'accéder directement à l'autocorrélation temporelle des signaux rencontrés expérimentalement. L'accès aux caractéristiques du mouvement n'était donc possible que via des méthodes indirectes, comme le contraste, assez imprécises et qualitatives. Toutefois, ces dernières années, la diffusion de plus en plus large de caméras haute cadence (jusqu'à plusieurs dizaines de kHz), a changé la donne. La voie s'est ainsi ouverte à un raffinement considérable des modèles et à des gains importants en précision et en rapidité de traitement.

Une telle caméra a été utilisée dans le cadre de ces travaux de thèse. Elle a permis d'imager la vascularisation sous-cutanée sur des zones variées du corps humain. On a ainsi pu évaluer la pertinence de plusieurs paramètres pour imager qualitativement le mouvement: l'efficacité du premier terme de la fonction d'autocorrélation, par exemple, a été mise en évidence. Dans le même temps, on a aussi pu constater certaines limites du speckle dynamique que la très haute cadence ne permettait pas de lever. Ainsi, au-delà d'un certain seuil, augmenter la cadence n'apporte plus d'information, tandis que l'hypothèse de stationnarité du signal est ébranlée par les effets de la pulsation cardiaque. Ces limites ne remettent pas en question l'apport considérable de la haute cadence, mais illustrent à quel point il s'agit d'un changement de paradigme.

Pour en prendre la pleine mesure et exploiter au maximum le gain en résolution temporelle permis par les

caméras rapides, il est nécessaire, en parallèle des études expérimentales, d'affiner les modèles existants. C'est dans cette optique qu'un travail de modélisation et de simulation du système d'imagerie a été mené. Notre but était de relier le plus précisément possible un type de dynamique du milieu aux statistiques du signal obtenu. Ainsi, il a été possible de redémontrer rigoureusement et de nuancer des résultats tenus pour phénoménologiques dans la littérature, tels que certains modèles d'autocorrélation temporelle. Ces résultats fondent la possibilité, à terme, de remonter à des grandeurs physiques fiables à partir d'un signal de speckle dynamique.

Enfin, comme les modèles inverses de speckle dynamique s'appuient sur des statistiques parfois complexes sur les signaux, il convient de s'assurer que celles-ci ne sont pas altérées par des traitements tiers. En particulier, beaucoup d'opérations de traitement du signal, notamment de rééchantillonnage (sur-échantillonnage, sous-échantillonnage, recalage) sont effectuées sans conscience des effets considérables qu'elles peuvent avoir sur les statistiques du signal. Un troisième axe de ces travaux a donc consisté à caractériser ces effets en fonction des méthodes utilisées. Il a par exemple été établi qu'un filtre passe-bas (préalable à un sous-échantillonnage) tend à générer d'autant plus de corrélation longue distance qu'il est resserré en fréquence --- et donc qu'il permet d'éviter l'aliasing. Le même type de résultat a été établi avec les méthodes d'interpolation.

Mots clés

Speckle, Imagerie médicale, Traitement du signal